



EESTI MAAÜLIKOOL  
Tehnikainstituut

**Karl Valter Pall**

**SOOLVEETEHNOLOOGIAL PÕHINEVA  
KÜTUSEELEMENDI KARAKTERISTIKUD**

CHARACTERISTICS OF A FUEL CELL BASED ON  
SALTWATER TECHNOLOGY

Bakalaureusetöö  
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: dotsent Risto Ilves, *PhD*

Tartu 2019

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Karl Valter Pall		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikud			
Lehekülgi: 39	Jooniseid: 20	Tabeleid: 3	Lisasid: 2
Osakond: Põllundus- ja tootmistehnika osakond			
ETIS-e teadusvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika			
CERC S-i kood: T130			
Juhendaja: Risto Ilves			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2019			
<p>Töö annab kirjanduse põhjal ülevaate kütuselemendist, selle ajaloost, arendustest, kütuseelemendi erinevatest tüüpidest ja kasutusvaldkondadest. Töö eesmärgiks on anda ülevaade soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikutest. Karakteristikute välja toomiseks tehti praktiline osa, kus mõõdeti pinge muutumist ajas erinevate kontsentratsioonidega elektrolüütide ning erinevast materjalist anoodide kasutamise korral. Mõõtmiste tulemuste põhjal saab järelda, et võrreldavatest anoodidest andis parima tulemuse magneesium. Magneesium ja selle sulamid kuuluvad ka kirjanduse järgi eelistatumate anoodi materjalide hulka. Optimaalseks elektrolüüdiks osutus 20% soolvesi. Soolveel põhinev kütuseelement on perspektiivikas.</p>			
Märksõnad: kütuseelement, soolveetehnoloogia, elektrood, elektrolüüt			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Karl Valter Pall		Curriculum: Technics and technology	
Title: Characteristics of a fuel cell based on saltwater technology			
Pages: 39	Figures: 20	Tables: 3	Appendixes: 2
Department: Agricultural and Production Engineering Field of research: ETIS research field: 4. (Natural Sciences and Engineering) CERC S code: T130 Supervisors: Risto Ilves Place and date: Tartu 2019			
This thesis gives an overview based on literature of a fuel cell, its history, developments, different types of fuel cells and their uses. The purpose of the thesis is to describe the characteristics of a fuel cell based on saltwater technology. In order to highlight these characteristics, tests were carried out to measure the change of voltage in time when using electrolytes with different concentration and anodes made of different materials. The results of the measurements show that the most effective from the anodes compared, was magnesium. Magnesium and its alloys are also preferred materials for anodes according to literature. 20% saltwater proved to be the optimal electrolyte. Therefore, a fuel cell based on saltwater technology has a promising perspective.			
Keywords: fuel cell, saltwater technology, electrode, electrolyte			

# SISUKORD

TÄHISED.....	5
SISSEJUHATUS .....	6
1. KÜTUSEELEMENDID .....	7
1.1. Kütuseelementide ajaloost .....	7
1.2. Kütuseelemendi tööpõhimõte .....	8
1.3. Kütuseelementide levinuimad tüübid.....	9
1.4. Soolveetehnoloogial põhinev kütuseelement .....	12
1.5. Näiteid soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi kohta tehtud patentidest.....	13
1.5.1. Merevee aku.....	13
1.5.2. Mereveel põhinev vooluallikas .....	16
2. SOOLVEEGA SÕITEV AUTO .....	19
3. SOOLVEETEHNOLOOGIAL PÕHINEVA KÜTUSEELEMENDI KARAKTERISTIKUTE MÄÄRAMINE .....	22
3.1. Metoodika .....	22
3.2. Tulemused ja arutelu.....	26
KOKKUVÕTE .....	32
KASUTATUD KIRJANUDS.....	33
LISAD .....	35
Lisa 1. Katseandmed.....	36
Lisa 2. Lihtlitsents .....	39

## **TÄHISED**

*AFC* – leeliskütuseelement

*CHP* – koostootmisjaam

*DMFC* – otsemetanool-kütuseelement

*MCFC* – sulakarbonaat-kütuseelement

*PAFC* – fosforhappe-kütuseelement

*PEMFC* – polümeerelektrolüüt-kütuseelement

*SOFC* – tahkeoksiid-kütuseelement

## SISSEJUHATUS

Soolveetehnoloogiat on kütuseelemendi juures kasutatud mitukümmend aastat. Kuid endiselt saab see tehnoloogia veel edasi areneda. Soolveetehnoloogiat võetakse kasutusele aina uutes valdkondades. Üheks intrigeerivamaks valdkonnaks on autotööstus. Arendamisel on soolveel töötav auto. Arvestades autotööstuse väga laia levikut maailmas võib see tähendada soolveetehnoloogia kasutamise olulist laienemist.

Töö eesmärgiks on uurida soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikuid.

Selleks on püstitatud järgmised ülesanded:

1. Anda ülevaade kütuseelemendi ajaloost.
2. Tutvustada erinevaid kütuseelemente.
3. Tuua näiteid soolveetehnoloogial põhinevatest kütuseelementidest ning nende karakteristikutest.
4. Uurida katseliselt soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikuid.
  - 4.1. Võrrelda kütuseelementide tööd erinevast materjalist anoodidega (Mg, Zn, Al);
  - 4.2. Võrrelda kütuseelementide tööd erinevate kontsentratsioonidega soolvee lahuste kasutamisel.

Töö on jaotatud kolmeks osaks, millest esimeses antakse ülevaade kütuseelemendi ajaloost ja erinevatest kütuseelementide liikidest. Teises osas räägitakse lähemalt soolvee kasutamisest autotööstuses. Kolmas osa on eksperimentaalne ning seal tuuakse välja soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikud.

# 1. KÜTUSEELEMENTID

## 1.1. Kütuseelementide ajaloost

Kütuseelement on keemiline elektrienergiaallikas, milles oksüdeerija ja kütuse keemiline energia muundub vahetult elektrienergiaks [1].

Kütuseelemendi isaks loetakse Franklin L. Pope'i arvates inglase Sir William Robert Grove. 1839. aastal avaldas Grove esimese töötava kütuseelemendi kirjelduse ja 1842. aastal selle joonised.

Tema esimene element sisaldas tsinki lahjendatud väävelhappes ja platinat kontsentreeritud lämmastikhappes, mis olid eraldatud poorses anumast.

Tema teine element, „gaasivoolu aku“, oli kaasaegsete kütuseelementide eelkäija. William Grove esitles esimest kütuseelementi 1839. aastal. Tema eksperiment põhines sellel, et juhtides elektrivoolu läbi vee, lagundab see vee selle komponentideks vesinikuks ja hapnikuks. Grove proovis reaktsiooni ümber pöörata - vesiniku ja hapniku reaktsioonil toota elektrit ja vett. See on lihtsa kütuseelemendi alus [2].

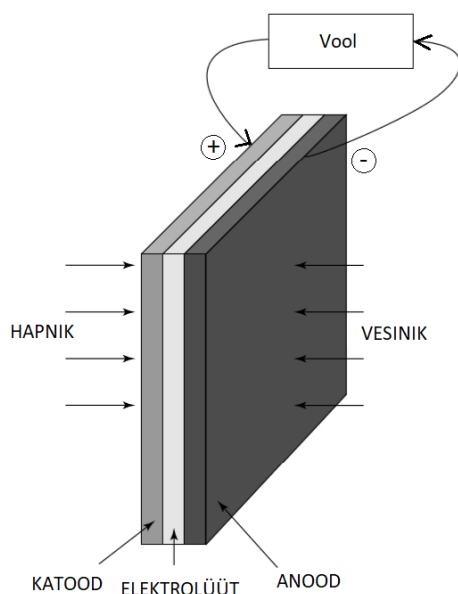
Pärast seda oli kütuseelement üle 100 aasta unustustehõlmas. Taas huvituti temast 1950ndatel aastatel ning õige varsti hakati kütuseelementi kasutama USA kosmoseprogrammis. 1990ndatel pöörasid oma pilgu kütuseelemendile nii energeetikud kui ka elektriautode konstruktorid [1].

## 1.2. Kütuseelemendi tööpõhimõte

Kütuseelement on elektrokeemiline seade, mis sarnaneb akupatareiga. Seade genereerib elektrienergiat maagaasist või teistest süsivesinikes. Soojus ja puhas vesi on protsessi kõrvalproduktideks. Kütusena tarbivad vesinikku enamik kütuseelemente. Kütuseelemendil puuduvad liikuvad osad ja ta võib töötada pikka aega ilma remondita, palju kauem kui näiteks sisepõlemismootor või turbiin.

Vesinik ja hapnik peavad vesiniku põlemisel kontakteeruma ning vahetama elektrone. Elektronide vahetus on kütuseelemendis aatomite kontaktist eraldatud. Elektrolüüt, mis eraldab kahte elementi, lubab läbida elektrootide vahelise vahemiku kas hapniku ioonil või vesiniku ioonil. Reaktsiooniks vajalik elektronide vahetus vesiniku ja hapniku vahel toimub välist elektriringi pidi mitte läbi elektrolüüdi. Tekib alalisvool. Kütuseelementide üheks võtmeküsimuseks on sobiva elektrolüüdi leidmine, mis lubaks liikuda hapniku või vesiniku aatomitel, kuid väldiks elektronide liikumise [3].

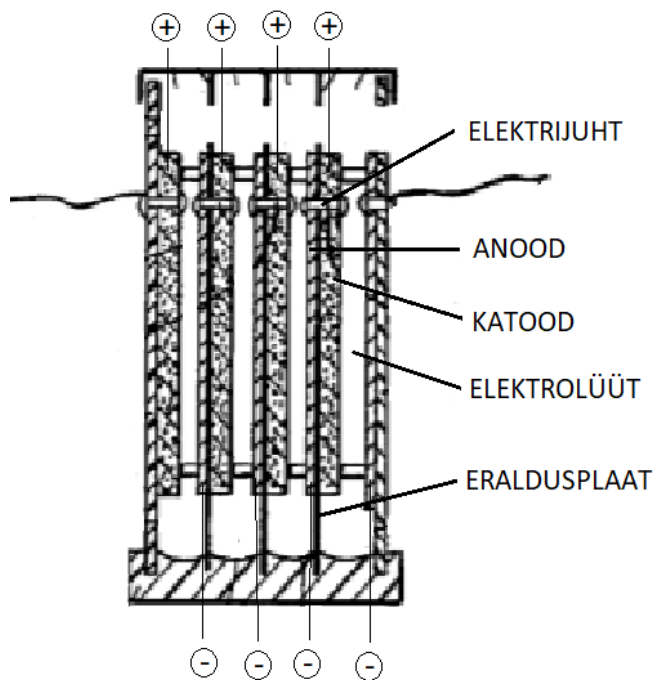
Kütuseelement koosneb elektrootidest – anoodist ja katoodist, mille vahel on elektrolüüt või ionivahetusmembraan (joonis 1.1). Elektrolüüt võib olla vedel (alused, happed, sulatatud sooda) või tahke (metalli oksiidid). Elektronide liikumine toimub anoodilt katoodile. Elektrolüüdi töötemperatuuri loetakse kütuseelemendi temperatuuriks [4].



**Joonis 1.1.** Kütuseelemendi katood-elektrolüüt-anood struktuur [4].



Joonisel 1.2 on kujutatud jadaühendusega kütuseelemendi üldskeem.



**Joonis 1.2.** Jadaühendusega kütuseelemendi üldskeem [5].

Jadaühendusega kütuseelement koosneb mitmest katood-elektrolüüt-anood struktuurist. Struktuurid on eraldatud eraldusplaadiga seejuures eraldusplaat paikneb anoodi ja katoodi vahel. Kõrvuti paiknevate struktuuride anood ja katood on ühendatud elektrijuhiga.

### 1.3. Kütuseelementide levinuimad tüübid

Jättes kõrvale sellised praktilised küsimused nagu tootmis- ja materjalikulud, on kütuseelementidega seotud kaks põhilist tehnilist probleemi. Esiteks aeglane reaktsiooni kiirus, mille tulemuseks on madal voolutugevus ja võimsus. Teiseks see, et vesinik ei ole valmiskujul kättesaadav kütus. Nende probleemide lahendamiseks on proovitud palju

erinevat tüüpi kütuseelemente. Kütuseelementide tüüpe eristatakse tavaliselt kasutatava elektrolüüdi järgi, kuigi on ka muid olulisi erinevusi. Elujõuliste süsteemidena on praeguseks välja kujunenud kuus kütuseelemendi klassi, ilmselt jääb seis selliseks ka lähitulevikus. Iga kütuseelemendi tüüp lahendab mõne probleemi, aga tekitab ka uusi juurde [4]. Põhiteave nende süsteemide kohta saab tabelist 1.

**Tabel 1.** Erinevat tüüpi kütuseelementide andmed [4]

Kütuseelement	Laengukandja	Töötemperatuur	Kasutusala
Polümeerelektrolüüt-kütuseelement ( <i>PEMFC</i> )	$H^+$	30-100°C	Sõidukid ja mobiilsed süsteemid ning madalama võimsusega <i>CHP</i> süsteemid
Leeliskütuseelement ( <i>AFC</i> )	$OH^-$	50-200°C	On kasutatud kosmosesõidukites nt. Apollo, Shuttle
Otsemetanool-kütuseelement ( <i>DMFC</i> )	$H^+$	20-90°C	Sobib väikese võimsusega kaasaskantavatele elektroonilistele süsteemidele, mis töötavad pikka aega
Fosforhappe-kütuseelement ( <i>PAFC</i> )	$H^+$	~220°C	Kasutusel paljudes 200kW <i>CHP</i> süsteemides
Sulakarbonaat-kütuseelement ( <i>MCFC</i> )	$CO_3^{2-}$	~650°C	Sobilik keskmistele ja suurtele <i>CHP</i> süsteemidele, kuni võimsuseni 1 MW
Tahkeoksiid-kütuseelement ( <i>SOFC</i> )	$O^{2-}$	500-1000°C	Sobilik igas suuruses <i>CHP</i> süsteemidele alates 2 kW kuni mitme MW

Polümeerelektrolüüt-kütuseelemendi (*PEMFC*) eeliseks on selle suhteline lihtsus. Elektrolüüdiks on tahke polümeer, milles liiguvad prootonid. Kuna elektrolüüt on tahke ja liikumatu, on see kütuseelemendi tüüp olemuslikult lihtne. Need elemendid töötavad üsna madalatel temperatuuridel, nii et aeglast reaktsiooni kiirust kompenseeritakse keerukate katalüsaatorite ja elektroodide abil. Katalüsaatoriks on plaatina, mille kogused on siiski niivõrd väikesed, et see moodustab vaid väikese osa *PEM* kütuseelemendi koguhinnast. Mõningaseks probleemiks on see, et kasutatav vesinik peab olema üsna puhas. Selle saavutamiseks on erinevaid teid.

Üks võimalik viis kütuseelemendi vesinikuga varustamiseks on kasutada metanooli. Sellist kütuseelementi kutsutakse otsemetanool-kütuseelemendiks (*DMFC*). “Otse”, sest

kasutatakse kütusena metanooli vedelal kujul, mitte vesiniku ekstraheerimisel metanoolist. Sellist tüüpi kütuseelemendil on küll vähe võimsust, aga vaatamata sellele on tal palju potentsiaalseid kasutusalasid ning neid tuleb juurde. Näiteks kaasaskantavad elektroonika seadmed. Sellised elemendid on vähemalt lähitulevikus väga väikese võimsusega ja neid kasutatakse seadetes, mis nõuavad aeglast ja pidevat elektritarbimist pika aja jooksul.

Kuigi esimesel mehitatud kosmosesõidukil kasutati *PEM*-kütuseelemente, olid Apollo ja Shuttle kosmoselaevade kütuseelemendid leeliselised (*AFC*). Aeglase reaktsiooni kiiruse probleem ületati, kasutades plaatina katalüsaatoriga väga poorseid elektroode ja mõnikord töötades üsna kõrgel rõhul. Tavaliseks töötemperatuuriks on leeliskütuseelemendil vähem kui 100° C, siiski on ajalooliselt mõnede leeliskütuseelementide töötemperatuur olnud ka umbes 200° C. Üks peamisi probleeme on CO<sub>2</sub> segav mõju. Puhtama hapniku ja vesiniku kasutamine aitab sellest üle saada.

Fosforhappe-kütuseelement (*PAFC*) oli esimene, mida toodeti kaubanduslikes kogustes ja mille kasutus maismaal on laialt levinud. Elektrolüüdiks on fosforhape. Paljud 200 kW elektri ja soojuse koostootmisjaamad on toodetud rahvusvahelise kütuseelementide korporatsiooni (UTC Fuel Cells Inc.) poolt ja paigaldatud Ameerikasse ning Euroopasse. Ka Jaapani ettevõtted tegelevad nende süsteemide tootmisega. Reaktsiooni kiiruse suurendamiseks mõistlikule tasemele kasutatakse poorseid elektroode, plaatina katalüsaatoreid ja üsna kõrget temperatuuri (~ 220 ° C). Kütusena kasutatakse maagaasi (põhiliselt metaani), mis lagundatakse vesinikuks ja süsihappegaasiks. See viib ülesse hinna, süsteemi keerukuse ja suuruse. Muus osas on süsteem pigem lihtne, usaldusväärne ja hooldusvaba. Mitmed fosforhappe-kütuseelemendid on rohkem kui aasta olnud pidevalt töös ilma suurema inimesepoolse sekkumisvajaduseta.

Sulakarbonaat-kütuseelemendi (*MCFC*) tööprotsessi eripäraseks omaduseks on süsihappegaasi olemasolu vajadus õhus. Tänu kõrgele töötemperatuurile saavutatakse piisav reaktsiooni kiirus suhteliselt odava katalüsaatori, nikli kasutamisel. Nikkel on ühtlasi elektroodi koosseisus. Kütusena kasutatakse gaase nagu maagaas ja kivisöegaas ilma eelneva töötlemiseta. Kuid seda lihtsust rikub mõnevõrra elektrolüüdi olemus: liitium-, kaalium- ja naatriumkarbonaatide kuum ja söövitav segu.

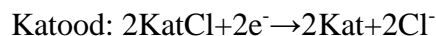
Tahkeoksiidi-kütuseelement (*SOFc*), mille elektrolüüdiks on tahke keraamiline materjal, töötab temperatuurivahemikus 600 kuni 1000 ° C. Tänu sellele on reaktsiooni kiirus piisav ilma kallite katalüsaatoriteta. Kütusena kasutatavat gaasi (nt. maagaasi) saab kasutada otse,

ilma eelnevalt lisaseadmetes lagundamata. See kütuseelemendi tüüp saab jagu paljudest eelnevate tüüpide probleemidest ja kasutab hästi ära kütuseelemendi kontseptsiooni olemuslikku lihtsust. Siiski, keraamilisi materjale millest need tehtud on, on raske töödelda ja seetõttu on need kallid. Samuti on vaja lisaseadmeid õhu ja kütuse eelsoendamiseks. Lisaks on jahutussüsteem keerukam. Nende seadmete käivitamine ei ole väga lihtne. Nagu nimigi näitab, jääb vaatamata kõrgele töötemperatuurile tahkeoksiidi-kütuseelemendi elektrolüüt tahkeks [3], [4], [6].

Lisaks põhilistele kütuseelementide tüüpidele on teisigi kütuselementide tüüpe. Näiteks bioloogilised kütuseelemendid, metall/õhk element, taaslaetavad kütuseelemendid [4].

#### **1.4. Soolveetehnoloogial põhinev kütuseelement**

Soolveetehnoloogial põhinev kütuseelement koosneb anoodist, katoodist ning elektrolüüdist, milleks on soolvesi. Sellised kütuseelemendid toimivad vastavalt järgmistele võrranditele:



kus anoodina on kasutatud magneesiumit ja katoodiks on mõni magneesiumist vähem aktiivne metall, tähistatud tähisega Kat [7]. Magneesiumanoodi puhul tekib reaktsiooni käigus magneesiumkloriid ning vabaneb kaks elektroni, mis liiguvad juhtme kaudu anoodilt katoodile. Kasutades anoodina näiteks alumiiniumit vabaneb tulenevalt anoodi materjalist kolm elektroni, mis liiguvad katoodile. Tsink anoodi puhul vabaneb kas üks või kaks elektroni. Kui elektronid on liikunud katoodile, siis katood redutseerub ehk liidab elektrone. Üldreaktsioonis tekib magneesiumkloriid.

Sellise kütuseelemendi puhul saab kasutada erinevaid anoode ja katoode. Erinevate anoodidena on erinevates patentides kasutatud näiteks magneesiumit ja selle sulameid, tsinki, alumiiniumit ja rauda. Katoodina on kasutatud hõbedat, vaske, pliid, rauda ja

hapniku [5], [7]–[9]. Tegelikult saaks nii anoodina kui ka katoodina kasutada ükskõik millist metalli peaasi, et üks oleks aktiivsem kui teine.

Soolveetehnoloogial põhinevat kütuseelemendi arendatakse mitmetest erinevatest aspektidest. Otsitakse uusi elektrokeemilisi reaktsioone. Katsetatakse erinevaid anode, katoode ja elektrolüüdi kontsentratsioone. Eraldi uuritakse näiteks magneesiumi mikrostruktuuri kütuseelemendi elektriliste omaduste parandamiseks. Veel otsitakse lahendusi muutmaks kütuseelemendi korpust ja struktuuri võimalikult kergeks, mõõtmelalt väikeseks, kujult varieeritavaks, odavaks, lihtsasti valmistatavaks, vaikselt töötavaks seejuures kaotamata elektrilisi omadusi. Nende eesmärkide saavutamiseks on tehtud mitmeid uurimis- ja arendustöid, mille eest on välja antud patente [5], [7]–[10].

Soolveetehnoloogial põhinevaid kütuseelemente on kasutatud meres mitmete vees olevate seadmete töös hoidmiseks. Sellised seadmed on näiteks sonarid ehk hüdrolokaatorid [8], mis on mõeldud vee all helide abil navigeerimiseks ja kauguste määramiseks. Sellistel juhtudel ongi soolane merevesi elektrolüüdiks.

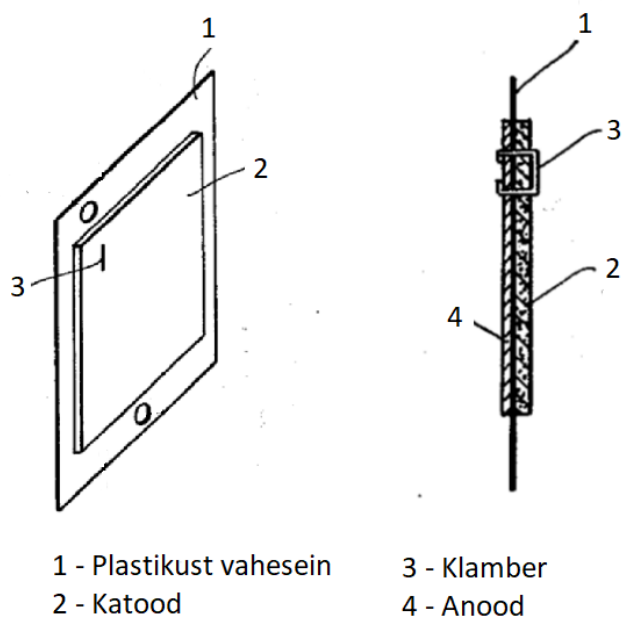
## **1.5. Näiteid soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi kohta tehtud patentidest**

### **1.5.1. Merevee aku**

Ameerika Ühendriikides anti välja 1976 aastal patent merevee aku kohta. Antud leiutiseks oli galvaaniline aku, mis koosnes mitmest bipolaarsest elektroodist. Leiutise esimeseks eesmärgiks oli välja pakkuda kompaktne ja kerge aku. Teine eesmärk oli konstrueerida aku, mille montaažitöö oleks minimaalne [5].

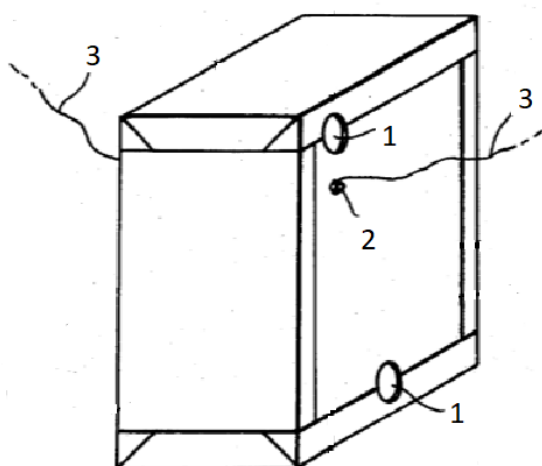
Akus kasutatud bipolaarsed elektroodid koosnesid vaheseinast, anoodist ja katoodist. Anood ja katood asetsesid vaheseina vastaskülgedel. Vaheseinad olid valmistatud painduva plastmaterjali lehest. Materjali valikul arvestati, et see oleks veekindel ning elektrit mitte juhtiv. Vaheseina paksus tehti nii õhuke kui võimalik. Oluline oli selle jäämine piisavalt

jäigaks, et olla isekandev. Anoodi, vaheseina ja katoodi hoidis koos klamber, mis toimis ka elektrijuhina ühelt kambritl teisele (joonis 1.3).



**Joonis 1.3.** Bipolaarne elektrood kahes vaates [5].

Akusse pandi sobiv arv bipolaarseid elektroode nii, et üks ots lõppeks anoodiga ja teine ots katoodiga. Bipolaarsed elektroodid asetati üksteise suhtes paralleelselt. Küljeseinad, mille külge otsmised anood ja katood olid kinnitatud, tehti jäigast plastikust. Aku põhi ja ülemine osa ning otsaseinad olid isoleermaterjalist ja nende kinnitamiseks kasutati kleeplinti (joonis 1.4).

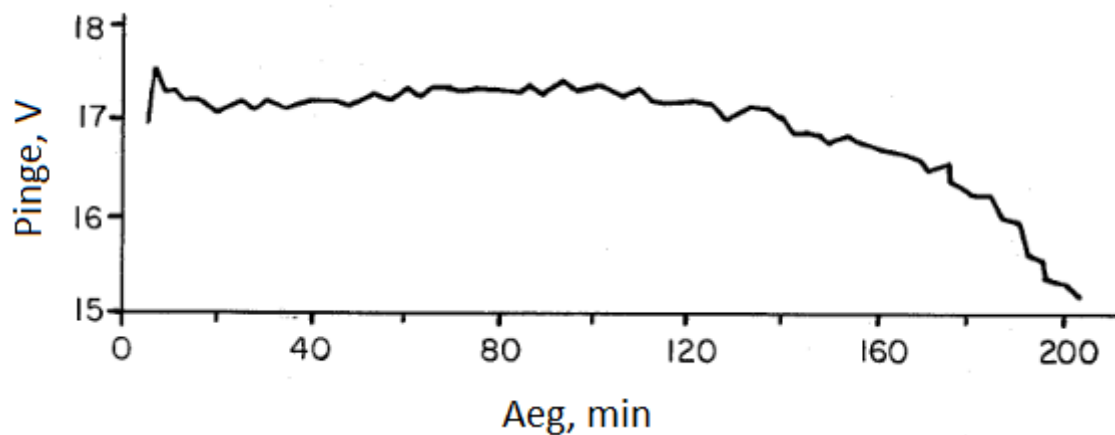


- 1 - Avad
- 2 - Klamber
- 3 - Juhtmed

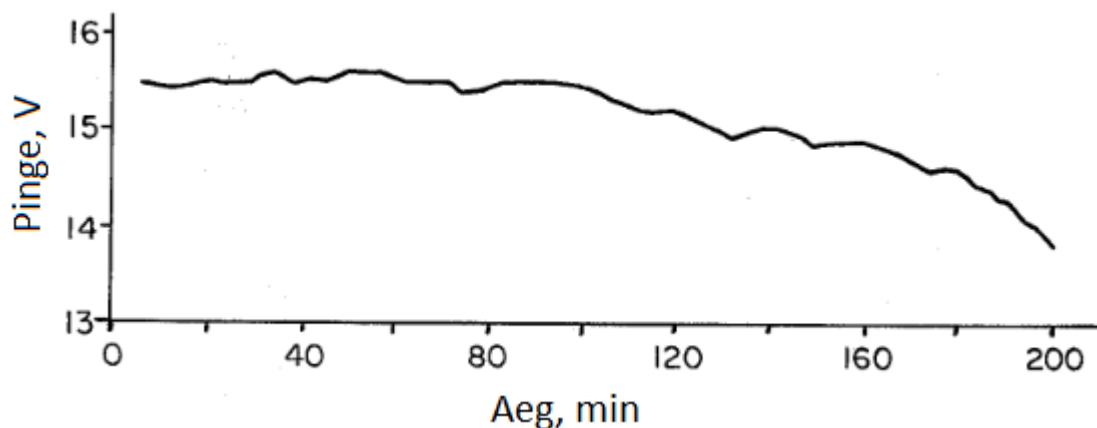
**Joonis 1.4.** Kokku pandud aku [5].

Joonisel 1.4 olevad avad olid akul selleks, et elektrolüüdile ehk mereveele oleks tagatud sissepääs ja väljapääs aku elektrokeemiliselt aktiivsete materjalide juurde. Küljeseina läbiv klamber oli elektriliselt ühendatud küljeseina küljes oleva anoodiga ning ühenduses ka juhtmega. Juhtmete kaudu jõuab vool voolutarbijani. Samasugune lahendus tagab ühenduse ka katoodiga, aku teisel küljel [5].

Akuga tehti kaks katset. Mõõdeti pinge muutust ajas. Katsete tulemused on toodud joonistel 1.5 ja 1.6.



**Joonis 1.5.** Pinge muutus ajas pliist katoodi puhul [5].



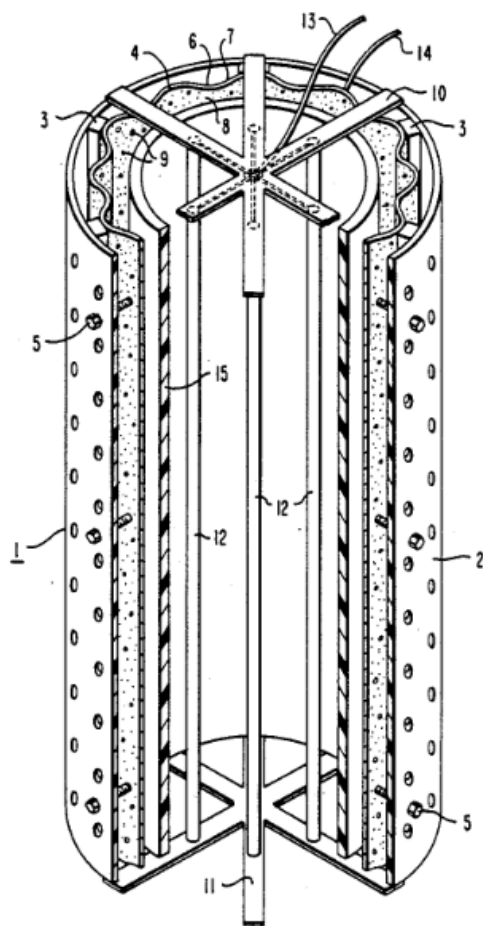
**Joonis 1.6.** Pinge muutus ajas hõbedast katoodi puhul [5].

Esimesel katsel kasutati 16 bipolaarse elektrodiga akut. Anoodiks oli magneesium ja katoodiks plii. Elektrolüüt oli 3% soolvesi temperatuuriga 30° C. Teisel katsel kasutati 13 bipolaarset elektroodi ning katoodiks hõbedat. Anoodiks oli endiselt magneesium ning elektrolüüdiks 3% soolvesi temperatuuriga 30° C [5].

### 1.5.2. Mereveel põhinev vooluallikas

Antud patent on välja antud Ameerika Ühendriikides aastal 1989. Avastati uus vooluallikas või aku merevees kasutamiseks (joonis 1.7). Avastatud aku töötas vastavalt uutele elektrokeemilistele reaktsioonidele, mis kasutavad anoodina magneesiumit või tsinki ja katoodina hapniku elektroodi. Käesolev leiutis töötab merevees ja seda ei saa laadida. Võrreldes näiteks magneesiumanoodi ja vasest või hõbedast katoodi kasutava akuga on see aku tunduvalt kergem. Lisaks võtab see aku palju vähem ruumi ning selle saab valmistada peaaegu igasuguse kujuga. Sellist akut ei ole keeruline valmistada ning aku saab kokku panna suhteliselt odavatest materjalidest [7].





**Joonis 1.7.** Vooluallikas või aku merevees kasutamiseks [7].

Joonisel 1.7 olev merevee aku 1 koosneb silindrilisest poorsest elektrit mitte juhtivast ümbrisest 2, mille sisemisel küljel on mitu samuti mitte juhtivat vahe pulka 3. Korpuse sees on hapniku elektroodi katood 4, mis on korpuse külge poltidega 5 kinnitatud. Katood koosneb metallraamist 6, mis toimib voolu kogujana poorse sideaine 7 sees, mis sisaldab süsiniku ja katalüsaatori osakesi 8, 9. Kinnitusdetailid 10, 11 aku mõlemas otsas on mitte juhtivast materjalist ning nende vahel on anoodvardad. Elektrijuhid 13, 14 on ühendatud anoodvarrastega ja katoodi plaadiga, et saaks voolu juhtida voolutarbijasse. Anoodivarraste ja katoodi vaheline polümeerne eraldaja 15 kaitseb katoodi saastumise eest. Voolukoguja on valmistatud materjalist, mis on hea voolujuht ning ei korrodeeru merevees. Sideaineks sobivad merevees stabiilsed plastid nagu polütetrafluoroetüleen, nailon, polüpropüleen, polüetüleen ja fenoolvaigud. Sideainet kasutatakse näiteks pulbri kujul. Katalüsaatoriteks sobivad väärismetallid nagu plaatina, hõbe ja pallaadium.

Selle patendi raames tehtud aku kasutas anoodina magneesiumvardaid, mis olid 2,5 cm läbimõõduga ja 15 cm pikad. Katood oli pindalaga umbes 800 cm<sup>2</sup> ja aku andis umbes 1,5 voldise pinge. Aku testi periood kestis üks kuu. Kuu jooksul saadud andmed on toodud tabelis 2 [7].

**Tabel 2.** Merevee akuga tehtud katse andmed [7]

Aeg, (päev)	Pinge (V)	Voolutugevus (mA)	Elektrolüüdi pH
1	1,46	50	6,5
3	1,47	46	6,8
5	1,46	53	7,1
10	1,45	51	6,7
15	1,47	48	6,6
20	1,46	47	7
25	1,45	49	6,9
30	1,46	48	6,8

Tabelis 2 toodud andmed näitavad, et aku töö on terve testiperioodi jooksul olnud väga stabiilne [7].

## 2. SOOLVEEGA SÕITEV AUTO

2014ndal aastal esitles ettevõtte NanoFlowcell AG Genfi automessil soolvee tehnoloogial põhinevat superautot Quant e-Sportlimousine, millest võib saada elektriautode tulevik. Auto on saanud heakskiidu sõita Euroopa teedel. Sellest on olnud juttu ka eesti keelses meedias [11], [12]. Järgnev ülevaade on tehtud erinevates meediaväljaannetes ilmunud artiklite põhjal [13]–[15].

Autol on neli elektrimootorit, mis saavad jõu soolveetehnoloogial põhinevast vooluallikast. Quant kasutas endist NASA tehnoloogiat, vooluakut, mis on varustatud „ioonse vedelikuga” - see tähendab lihtsa soolveega. See ei ole päris nii lihtne, et paak täidetakse mereveega, kuid ei ole kahtlust, et süsteem on keskkonnasõbralikum kui ükski teine jõusüsteem võiks olla, välja arvatud ehk päikeseenergia. Auto saab oma energia "vooluelemendist", mis koosneb kahest 159-liitrisest mahutist, mis on täidetud erineva elektrolüütilise vedelikuga - üks positiivse laenguga ja üks negatiivse laenguga. Mahutid on eraldatud membraaniga ning kahe vedeliku kokkusaamine ja koostoime tekitavad elektrilaengu.

Soolvee kütusest on vähe avalikku informatsiooni. Niinimetatud bi-ioon on vedelik, mis sisaldab nii orgaanilisi kui ka anorgaanilisi sooli. NASA loobus sellest tehnoloogiast 1970ndatel, sest energiatihedus oli liiga halb, kuid NanoFlowcell'i salapärase ja entusiastlik tehniline ametnik Nunzio la Vecchia 16-aasta pikkune töö keemia alal on ilmselt viinud vajaliku läbimurdeni. Väidetavalt ületab tehnoloogia sama kaaluga liitium ionaku energia mahtuvuse viie kordselt. Mis täpselt on läbimurdeni viinud la Vecchia ei ütle, sest patent on alles taotlemisel.

Ka protsessi keemiast ei avaldata palju informatsiooni. Üks bi-ioon vedeliku osa omab positiivset laengut ning teine negatiivset laengut. Auto pumpab need vedelikud läbi membraani, kus laetud elektronide koostoimel tekib elektrilaeng. Vedelik aurustatakse ja see vabaneb ohutult niinimetatud „vee tolmu”na. See võimaldab mahutil tühjeneda, et seda saaks uuesti täita. Kuna kütus on põhiliselt soolane vesi, siis leidub seda rikkalikult ja seda

saab toota peaaegu kõikjal. Jällegi on täpne protsess hoolikalt salastatud, kuid la Vecchia ütleb, et seda saab toota laialdaselt ja see on täielikult süsinikuvaba.

Energia salvestamiseks kasutatakse superkondensaatorit, mis on nagu hiiglaslik tööstusliku tugevusega aku ning vastupidavama laadimis-mahalaadimis tsükliga kui tavaline aku. Selliselt saadakse mootorsõiduki liikumiseks vajalik võimsus. Selline superkondensaator on kõigest kingakarbi suurune.

Erinevalt enamikest elektriautodest kasutab Quant e-Sportlimousine madalpinget. Madalat pinget kasutatakse tavaliselt väikese kiirusega sõidukites, nagu golfikärud. Arendaja väitel lubab kõrge voolutugevus ja madal pinge kasutada tavapärasest peenemaid kaableid.

Kütus on ohutu – ei ole lenduv nagu bensiin. Seda on lihtne ladustada ja transportida. Erinevalt bensiinist ei ole bi-ioonil säilivusaja piirangut. Kütus pumbatakse autosse kahe-düüsilise pumba abil (joonis 2.1.). Tankimine võtab aega umbes viis minutit nagu ka tavapärase autokütuse puhul. Autot ei ole vaja pistikukaudu laadimisjaamaga ühendada mitmeks tunniks. Praegu küll puudub selle kütuse levitamiseks infrastruktuur kuid sama seisukord oli ka elektriautode tulekul.



**Joonis 2.1.** Kahe-düüsiline tankimisseade. Auto vajab nii positiivse kui ka negatiivse laenguga vedelikku (foto võetud BBC veebileheküljelt [14]).

Auto kohta on avaldatud järgmised parameetrid [11]:

Võimsus: 920 hobujõudu

Kiirendus: 0-100 km/h: 2,8 sekundiga

Tippkiirus: 380 km/h

Sõiduulatus: 400-600 km (mõned allikad [14] räägivad ka sõiduulatusest 1100 km)

Energiakulu: 20 kWh/100 km

Esimesel prototüübil on kaks 200-liitrist paaki

Läbivooluelemendid võivad läbida 10 000 laadimistsükli

Autoportaalide hinnangul võib Quant e-Sportlimousine maksta 1,37 miljonit eurot (joonis 2.2).



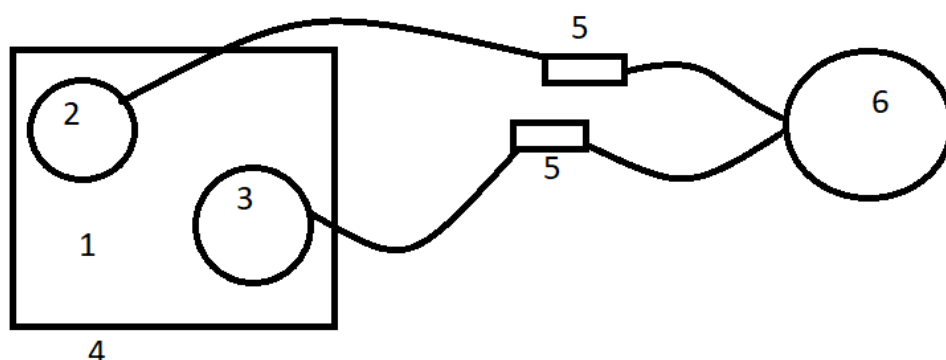
**Joonis 2.2.** Soolveega sõitev auto Quant e-Sportlimousine. (Foto võetud meedia väljaandest collective-evolution [15]).

NanoFlowcell on ette valmistamas tehnoloogia masstootmist. Arendaja on veendunud, et selle tehnoloogia potentsiaal on laiem kui vaid autotööstus. Eelkõige nähakse rakendust kodumajapidamiste energiavarustuses, samuti mere, raudtee ja lennundus alal [13], [15].

### 3. SOOLVEETEHNOLOOGIAL PÕHINEVA KÜTUSEELEMENDI KARAKTERISTIKUTE MÄÄRAMINE

#### 3.1. Metoodika

Soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikute saamiseks viidi läbi katsed. Esimeses katseseerias kasutati erineva kontsentratsiooniga elektrolüüti, erinevast materjalist anoodi, katoodi ja voolutarbijat (joonis 3.1.). Pinge mõõtmiseks kasutati multimeetrit.



- |                 |                  |
|-----------------|------------------|
| 1 - Elektrolüüt | 4 - Anum         |
| 2 - Anood       | 5 - Mõõtekohad   |
| 3 - Katood      | 6 - Voolutarbija |

**Joonis 3.1.** Esimese katseseeria skeem

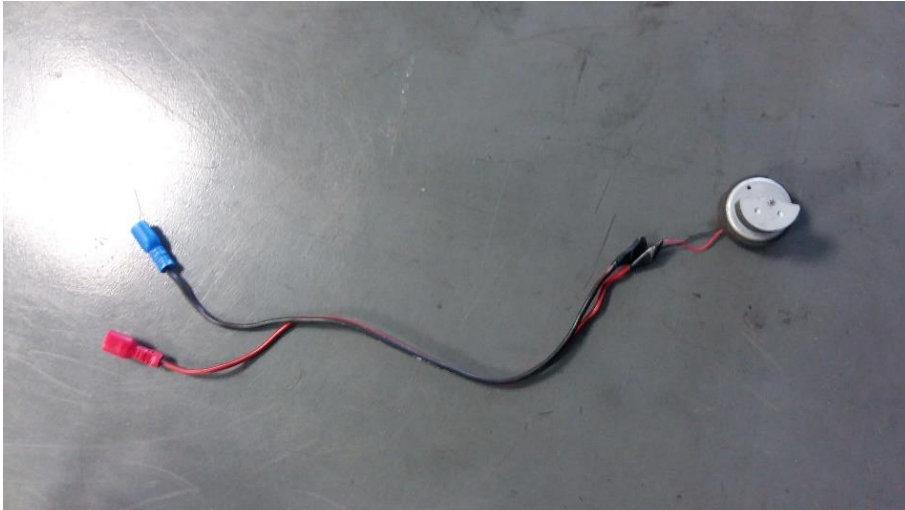
Katsete läbiviimiseks asetati anood ja katood elektrolüüdiga täidetud anumasse. Anood ja katood olid ühendatud juhtmetega voolutarbijaga selliselt, et oleks võimalik mõõta pinget. Ühe katse kestus oli 60 minutit. Pinget mõõdeti iga 10 minuti tagant. Erinevate



katseseeriates käigus varieeriti anoodi materjali ja elektrolüüdi kontsentratsiooniga. Elektrolüüdiks kasutati nelja erineva kontsentratsiooniga soolvett: 33%, 20%, 10% ja 3,5%. Anoodidena kasutati erinevates katseseeriates magneesiumit, alumiiniumit ja tsinki (joonis 3.2). Magneesiumanood oli tegelikult sulam 93% magneesiumit ja 7% alumiiniumit. Elektrolüüdiga kokkupuutuvat pinda oli katses kasutatud magneesiumipulgal 26 cm<sup>2</sup>. Alumiiniumi tüki pindala oli 45 cm<sup>2</sup>. Tsinkanoodina kasutatud seibi pindala oli 9 cm<sup>2</sup>. Neid tuli kasutama mitut, kuna seib oli tsingitud, siis õhuke tsingikiht reageerib ära enne kui kõik katsed jõutakse lõpuni viia. Katoodiks kasutati terastoru. Millel oli elektrolüüdiga kokkupuutuvat pinda ligikaudu 100 cm<sup>2</sup>. Voolutarbijana kasutati mikromootorit (joonis 3.3).



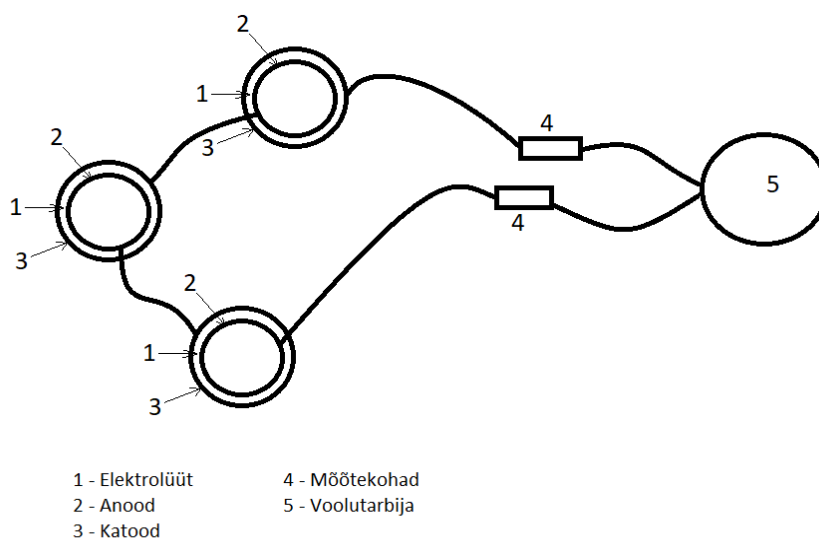
**Joonis 3.2.** Kasutatud anoodid, vasakult: magneesium, alumiinium, tsink



**Joonis 3.3.** Katsel voolutarbijana kasutatud mikromootor

Et kõikide katsete ajal oleksid tingimused võimalikud võrdsed, kasutati soola lahuses vett alati 200 ml temperatuuriga 23°C. Lisaks puhastati enne igat mõõtmist anoodi metallnuustikuga ja vajadusel lükati katoodile tekkinud õhuke rooste kiht viiliga maha.

Teise katse eesmärgiks oli soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikute mõõtmine jadaühenduse puhul. Jadaühendusega kütuseelemendi üldskeem on toodud peatükis 1.2 joonisel 1.2. Sellel katsel kasutati kolme elemendiga jadaühendust (joonised 3.4 ja 3.5).



**Joonis 3.4.** Teise katse skeem



Teisel katsel kasutatud katoodide ja anoodide mõõdud on toodud tabelis 3.

**Tabel 3.** Elektrolüüdiga kokku puutuv pindala jadaühendusega katsel

Element	Anood	Katood
1	8,0 cm <sup>2</sup>	14,1 cm <sup>2</sup>
2	7,5 cm <sup>2</sup>	11,9 cm <sup>2</sup>
3	6,1 cm <sup>2</sup>	10,2 cm <sup>2</sup>



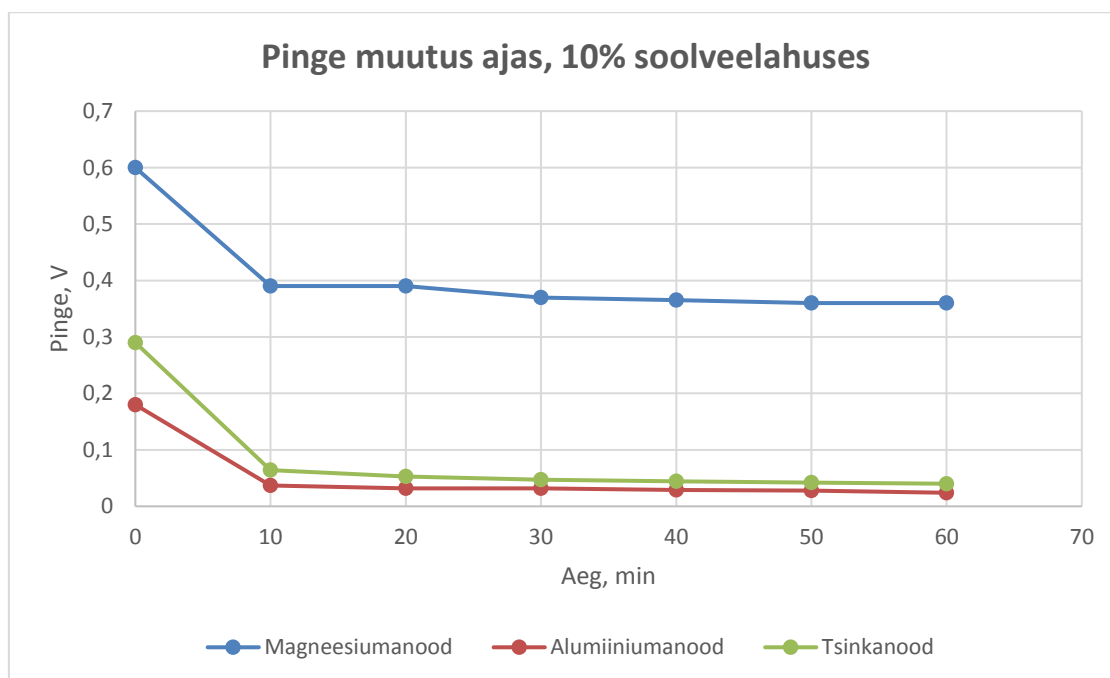
**Joonis 3.5.** Jadaühendusega katseks valmis seatud elemendid

Jadaühendusega katsel (joonised 3.4 ja 3.5) kasutatavaks katoodiks oli terasest toru. Katoodi sisse asetati magneesiumist anood, mille ümber oli keeratud paber ning paberisse süstiti 1 ml 20% soolvett. Voolu tarbija ühendati juhtmega esimese elemendi katoodiga, esimese elemendi anood ühendati teise elemendi katoodiga, teise elemendi katood oli ühenduses kolmanda elemendi anoodiga ning kolmanda elemendi anood voolu tarbijaga.

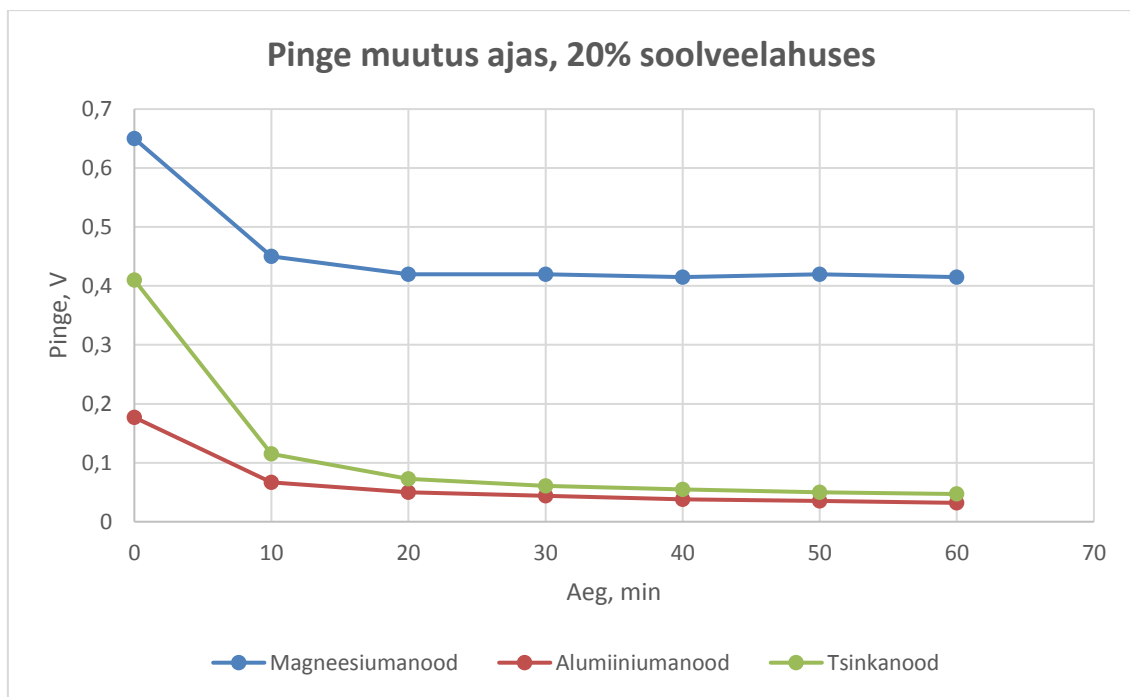
### 3.2. Tulemused ja arutelu

Kõigi kolme anoodiga tehti neli katset. Kasutades igal katsel erineva soolsusastmega vett. Elektrolüüdiks võeti 10% soolasisaldusega, 20% soolasisaldusega, 33% soolasisaldusega lahused. Lisaks kasutati 3,5% soolsusega vett, mis vastab maailmamere keskmisele soolsusele.

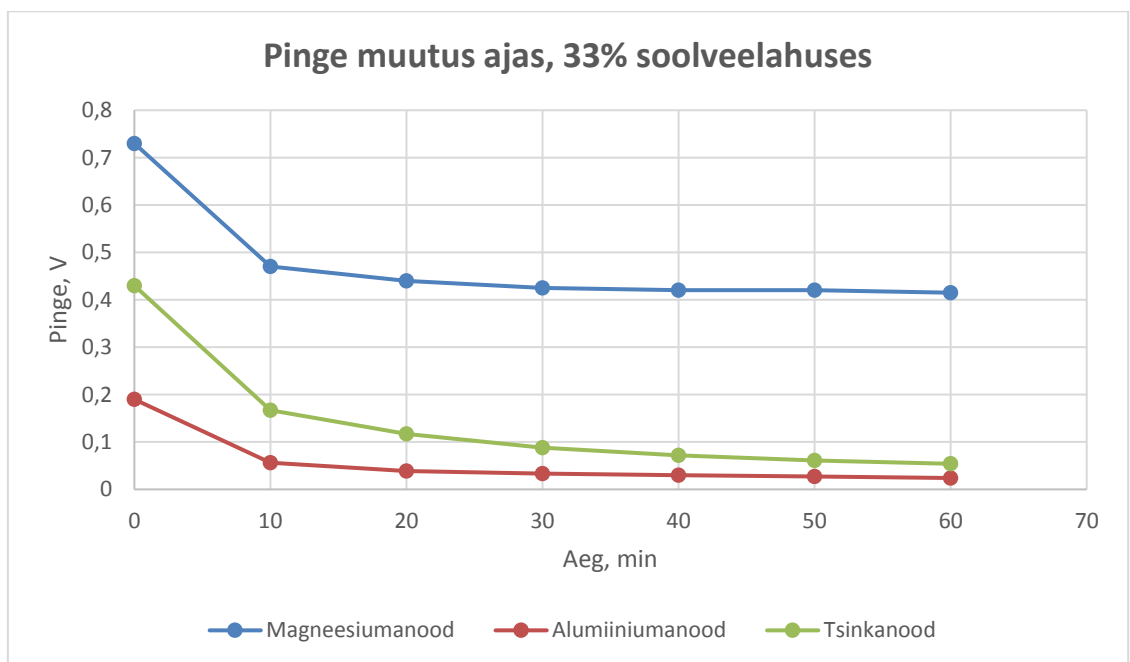
Esimese katseseeria tulemused on toodud järgmisel neljal joonisel (joonised 3.6 kuni 3.9, lisa 1). Iga joonis illustreerib pinge muutust erineva kontsentratsiooniga soolveelahuse korral.



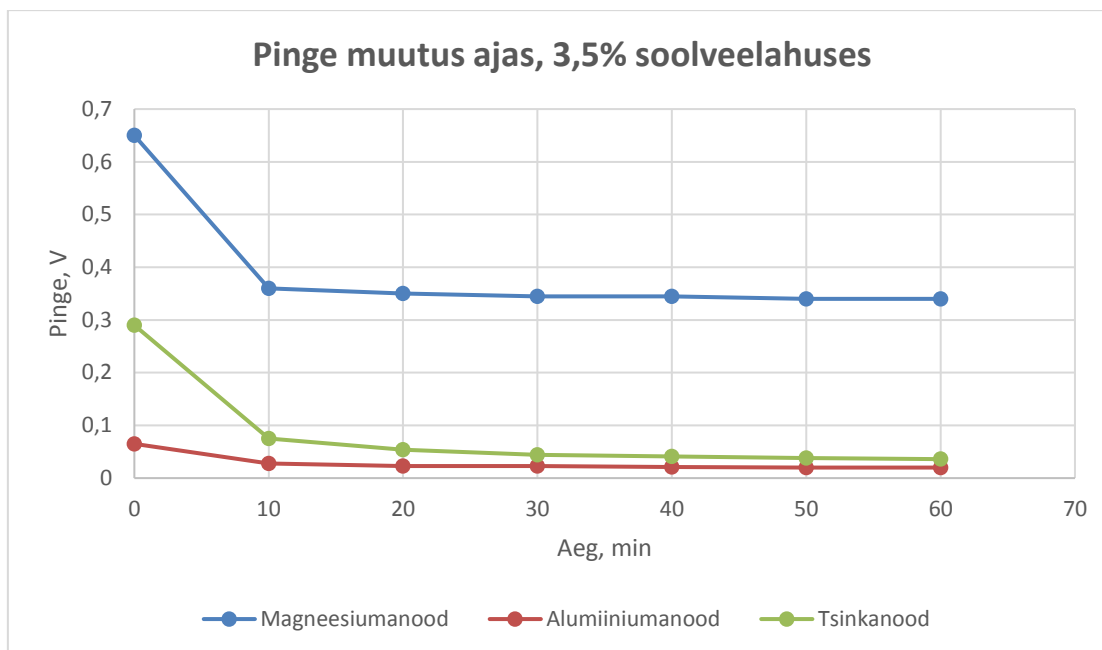
**Joonis 3.6.** Pinge muutus ajas 10% soolveelahuse korral



**Joonis 3.7.** Pinge muutus ajas 20% soolveelahuse korral



**Joonis 3.8.** Pinge muutus ajas 33% soolveelahuse korral



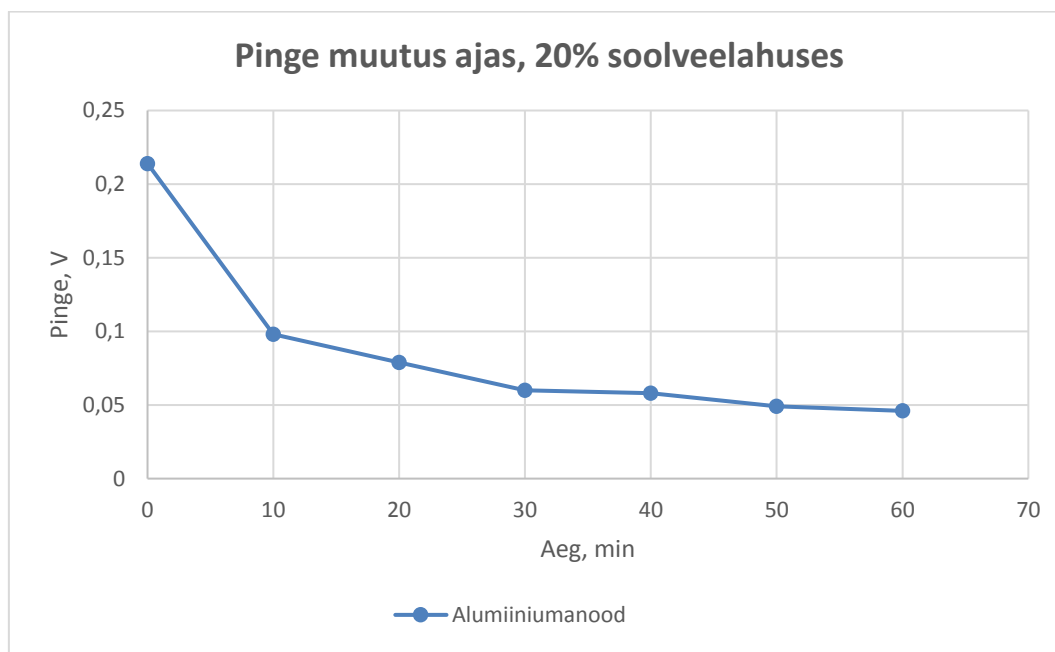
**Joonis 3.9.** Pinge muutus ajas 3,5% soolveelahuse korral

Kõik graafikud näitavad, et selgelt tugevaima pinge andis katseseerias magneesiumanood. Alumiinium ja tsink tekitasid üsna nõrga pinge. Neist tsink veidi tugevama. Kogu katseseerias toimus sõltumata anoodist esimestel minutitel suur pingelang. See on tingitud sellest, et anoodi just puhtaks tehtud pind „saastub“ elektrolüüdis kiiresti. Samas tekkiv kiht takistab anoodi edasist saastumist ja pinge stabiliseerub.

Erinevaid graafikuid vaadates saab ka mõned järeldused teha erinevate elektrolüütide kohta. 33% (joonis 3.8) ja 20% (joonis 3.7) lahus andsid üsna sarnase pinge. 10% soolveega saavutatud pinge (joonis 3.6) oli veidi nõrgem ja 3,5% lahusega (joonis 3.9) natuke veel nõrgem. Vaadates näiteks magneesiumanoodiga saadud tulemusi, on näha, et 33% ja 20% kontsentratsiooniga elektrolüüdi puhul jäi pinge stabiilselt 0,42 voldi juurde. 10% elektrolüüdi korral oli pinge stabiilselt 0,38 voldi juures ja 3,5% elektrolüüti kasutades oli pinge stabiilselt 0,34 volti. Samas vahed olid üpris väikesed ja ka maailmamere keskmise soolsusega vett kasutades sai vähemalt magneesiumanoodiga märkimisväärse pinge tekitada.

Kuna kasutatud anoodide pindalad olid erinevad, siis tehti kontroll katse, saamaks teada, kas see mõjutas tulemusi. Selleks tehti üks eelnevatega samasuguse katse, kasutades oluliselt väiksemat (2 cm<sup>2</sup> pindalaga) alumiiniumanoodi 20% elektrolüüdis (joonis 3.10,

lisa 1). Kui võrrelda pinge muutust suurema ja väiksema alumiiniumanoodi puhul (erinevus ca 20 korda), on see praktiliselt olematu (joonised 3.7 ja 3.10). Seega antud katseseerias anoodide pindalade erinevused katsetulemusi ei mõjutanud ja omavahelist võrdlust ei sega.

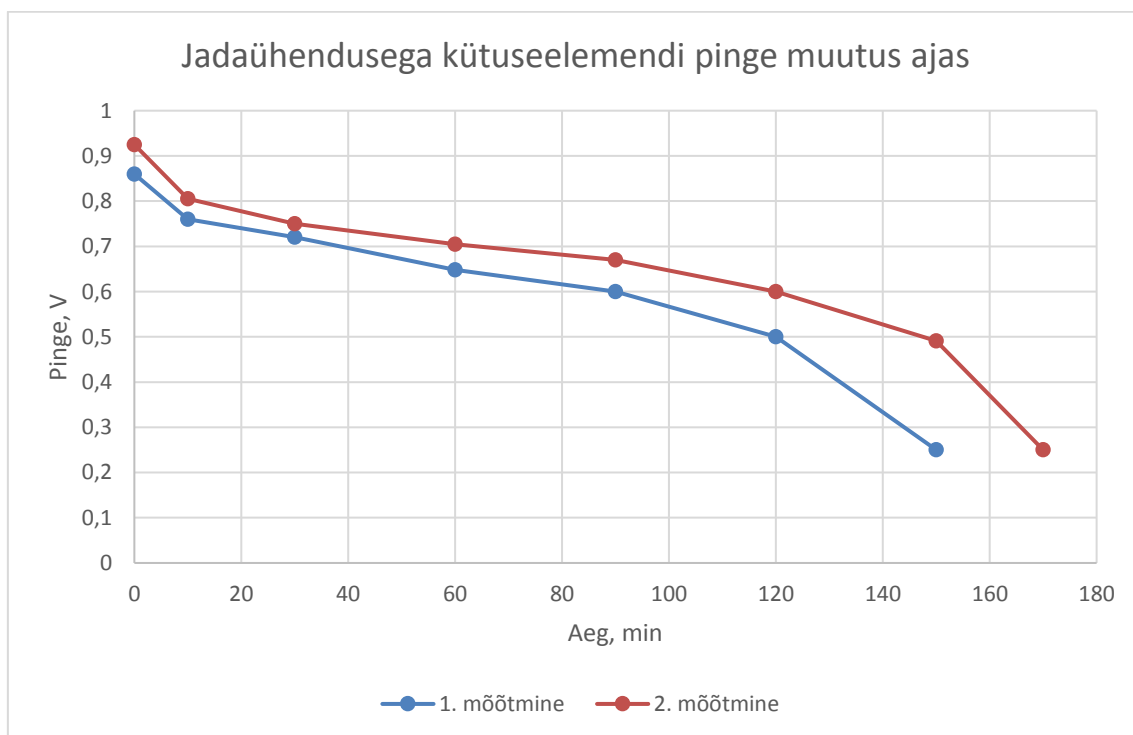


**Joonis 3.10.** Pinge muutus ajas kasutades 2 cm<sup>2</sup> anoodi

Peatükis 1.5.2. kirjeldatud patendis tehti merevee aku, mis kasutas magneesiumanoodi. Elektrolüüdiks kasutati merevett, mille koostis oli ilmselt üsna sarnane käesolevas töös tehtud katsega, kus kasutati 3,5% soolvett ning anoodiks oli sammuti magneesium. Nende kahe katse kestused on küll väga erinevad kuid vaatamata sellele saab neid katseid omavahel veidi võrrelda (tabel 2 ja joonis 3.9). Patendis tehtud katsel oli pinge stabiilselt 1,45 voldi lähedal. Käesolevas töös tehtud katsel püsis pinge 0,34 voldi peal. Pinge erinevuse põhjuseks võiks olla erineva katoodi kasutamine ning ka katoodi mõõtmete erinevus. Mõlema katse puhul on näha, et pinge on katse vältel väga stabiilne. Ning võib arvata, et ka käesolevas töös tehtud katse oleks võinud kesta veel pikalt ning ka ühtlane pinge oleks püsinud.

Teise katse eesmärgiks oli tuua välja soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikud jadaühenduse puhul. Katses kasutati eelneva katseseeria põhjal tuvastatud

parimat anoodi ja optimaalseimat elektrolüüti. Nendeks olid magneesiumanood ja 20% soolalahus. Jadaühendusega tehti kaks katset sarnastel tingimustel. Mõõtmistulemused on toodud joonisel 3.11 (lisa 1). Katsel lasti kesta nii kaua kuni antud kütuseelement suutis voolutarbijat hoida töös. Esimesel mõõtmisel püsis voolutarbija töös 150 minutit. Teisel mõõtmisel püsis voolutarbija töös 170 minutit. Voolutarbija lakkas töötamast kui pinge langes alla 0,25 voldi. Jooniselt 3.11 on näha, et esimesel katsel oli pinge terve katse vältel veidi madalam kui teisel katsel. Selle põhjuseks võiks olla anoodi puhtus katse alguses. Nimelt enne esimest mõõtmist puhastati katses kasutatud anoodid metallnuustikuga umbes 15 tundi enne katse algust. Teisel mõõtmisel, aga vahetult enne katse algust. Ehk esimese katse puhul oli magneesiumil 15 tundi aega õhu käes seisa ja pind jõudis veidi oksüdeeruda. Kütuseelement lõpetas piisava voolu tekitamise ilmselt seetõttu, et elektrolüüt kuivas ära. Antud katses oli elektrolüüdi kogus ühes elemendis ainult 1 ml. Esimese katse 20 minutilist varem lõppemist võrreldes teise katsega ei seostaks anoodi puhtuse erinevusega vaid pigem elektrolüüdi kuivamiskiirusega.



**Joonis 3.11.** Jadaühendusega kütuseelemendi pinge muutus ajas. Kasutatud on magneesium-anoodi ja 20% soolveelahust.

Sellel katsel saadud tulemusi saab võrrelda peatükis 1.5.1 kirjeldatud patendi tegemisel saadud tulemustega, mis on toodud joonistel 1.5 ja 1.6. Esimesena paistab välja väga suur pinge erinevus. Selle põhjused peituvad kindlasti akude erinevuses. Nimelt kasutati patendis tehtud katsete puhul koguni 16 ja 13 elemendist koosnevat akut kui antud töös tehtud katsel oli kasutusel vaid kolm elementi. Ka katoodid olid võrreldavatel katsetel erinevad. Huvitaval kombel hakkas toimuma kõigi nelja katse puhul pinge järsk langus enam-vähem ühel ajal ehk 120-160 minuti juures. Kui käesolevas töös tehtud katsete puhul on põhjus üpris selge, elektrolüüdi kuivamine, siis 1976 aastal tehtud patendis oli aku merevette uputatud ja elektrolüüdi puudus pinge järsu languse põhjuseks olla ei saanud.

## KOKKUVÕTE

Soolveetehnoloogia kasutamine kütuseelemendi juures on äärmiselt perspektiivikas ja aina edasi arenev suund.

Töö eesmärgiks on uurida soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikud.

Eesmärgi täitmiseks sooritati järgmised ülesanded:

1. Anti ülevaade kütuseelemendi ajaloost.
2. Tutvustati erinevaid kütuseelemente.
3. Toodi näiteid soolveetehnoloogial põhinevatest kütuseelementidest ning nende karakteristikutest.
4. Uuriti katseliselt soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikuid.
  - 4.1. Võrreldi kütuseelementide tööd erinevast materjalist anoodidega (Mg, Zn, Al);
  - 4.2. Võrreldi kütuseelementide tööd erinevate kontsentratsioonidega soolvee lahuste kasutamisel.

Töös välja toodud soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikute võrdlemisel selgus:

1. Töös kasutatud anoodi materjalidest (Mg, Zn, Al) andis parimad tulemused magneesium.
2. Optimaalseks elektrolüüdi soolsuseks oli 20%.
3. Anoodi pindala, mis elektrolüüdiga kokku puutus, ei mõjutanud antud katse tingimuste juures tekkinud pinge suurust.
4. Anoodi puhtus mõjutab kütuseelemendi poolt tekitatavat pinget.
5. Katses kasutatud jadaühendusega kütuseelemendi töö kestuse juures on oluline kasutatava elektrolüüdi kogus.



## KASUTATUD KIRJANUDS

- [1] E. Pajumets, „Kas kütuseelemendist saab tuleviku energiatootja?“, *Keskkonnatehnika*, kd 3, 1998.
- [2] F. L. Pope, *Modern Practice Of The Electric Telegraph*. Merchant Books, 2007.
- [3] TTÜ mehaanikateaduskond, „Kütuseelemendid. Õppematerjal“, lk 108–118.
- [4] J. Larminie ja A. Dicks, *Fuel cell systems explained*, 2nd ed. Chichester, West Sussex: J. Wiley, 2003.
- [5] R. H. Robinson ja A. J. Rossi, „Attorney, Agent, or Firm-Wm. Wharton Smith“, lk 7.
- [6] S. V. M. Guaitolini, I. Yahyaoui, J. F. Fardin, L. F. Encarnacao, ja F. Tadeo, „A review of fuel cell and energy cogeneration technologies“, *2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Hammamet, 2018, lk 1–6.
- [7] J. F. Jackovit, D. Zuckerbrod, ja E. S. Buzzelli, „SEAWATER POWER CELL“, lk 6.
- [8] L. E. Klein ja D. W. Conte, „73) Assignee: Magnavox Electronic Systems“, lk 8, 1994.
- [9] „Study on Mg alloy anode material for seawater battery--《Chinese Journal of Power Sources》2007年05期“. [Online]. Available at: [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-DYJS200705015.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-DYJS200705015.htm). [Vaadatud: 18-mai-2019].
- [10] H. Zhao, P. Bian, ja D. Ju, „Electrochemical performance of magnesium alloy and its application on the sea water battery“, *J. Environ. Sci.*, kd 21, lk S88–S91, jaan 2009.
- [11] „Soolveega sõitev superauto loodab maailma muuta“, *Äripäev*. [Online]. Available at: <https://www.aripaev.ee/uudised/2014/11/15/soolveega-soitev-superauto-loodab-maailma-muuta>. [Vaadatud: 19-mai-2019].
- [12] „Soolveega sõitev auto kimab börsile“. [Online]. Available at: <https://www.aripaev.ee/uudised/2016/07/23/soolvee-auto-soidab-borsile>. [Vaadatud: 14-mai-2019].
- [13] „The car that runs on SALTWATER: Vehicle reaches 0-60mph in 2.8 seconds“, *Mail Online*, 01-sept-2014. [Online]. Available at: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2739768/The-sports-car-runs-SALTWATER-Vehicle-goes-0-60mph-2-8-seconds-just-approved-EU-roads.html>. [Vaadatud: 19-mai-2019].

- [14]Editors, „The sports car that runs on saltwater“. [Online]. Available at: <http://www.bbc.com/autos/story/20161010-driving-the-saltwater-sports-car>. [Vaadatud: 19-mai-2019].
- [15]A. Walia, „This Car Is Powered By Salt Water: 920HP, Top Speed 217.5 MPH, 373 Miles/Tank“. [Online]. Available at: <https://www.collective-evolution.com/2018/05/05/this-car-is-powered-by-salt-water-920hp-top-speed-217-5-mph-373-milestank/>. [Vaadatud: 19-mai-2019].

**LISAD**

## Lisa 1. Katseandmed

**Tabel 4.** Pinge muutus ajas 10% soolveelahuses

Aeg, min	Magneesiumanood	Alumiiniumanood	Tsinkanood
0	0,6	0,18	0,29
10	0,39	0,037	0,064
20	0,39	0,032	0,053
30	0,37	0,032	0,047
40	0,365	0,029	0,044
50	0,36	0,028	0,042
60	0,36	0,024	0,04

Pinge ühik: volt.

**Tabel 5.** Pinge muutus ajas 20% soolveelahuses

Aeg, min	Magneesiumanood	Alumiiniumanood	Tsinkanood
0	0,65	0,177	0,41
10	0,45	0,067	0,115
20	0,42	0,05	0,073
30	0,42	0,044	0,061
40	0,415	0,038	0,055
50	0,42	0,035	0,05
60	0,415	0,032	0,047

Pinge ühik: volt.

**Tabel 6.** Pinge muutus ajas 33% soolveelahuses

Aeg, min	Magneesiumanood	Alumiiniumanood	Tsinkanood
0	0,73	0,19	0,43
10	0,47	0,056	0,167
20	0,44	0,039	0,117
30	0,425	0,033	0,088
40	0,42	0,03	0,072
50	0,42	0,027	0,061
60	0,415	0,024	0,054

Pinge ühik: volt.

**Tabel 7.** Pinge muutus ajas 3,5% soolveelahuses

Aeg, min	Magneesiumanood	Alumiiniumanood	Tsinkanood
0	0,65	0,065	0,29
10	0,36	0,028	0,075
20	0,35	0,023	0,054
30	0,345	0,023	0,044
40	0,345	0,021	0,041
50	0,34	0,02	0,038
60	0,34	0,02	0,036

Pinge ühik: volt.

**Tabel 8.** Pinge muutus ajas 20% soolveelahuses, 2 cm<sup>2</sup> anoodi korral

Aeg, min	Alumiiniumanood
0	0,214
10	0,098
20	0,079
30	0,06
40	0,058
50	0,049
60	0,046

Pinge ühik: volt.

**Tabel 9.** Mitme elemendiga vooluallika pinge muutus ajas

Aeg, min	1. mõõtmine	2. mõõtmine
0	0,86	0,925
10	0,76	0,805
30	0,72	0,75
60	0,648	0,705
90	0,6	0,67
120	0,5	0,6
150	0,25	0,491
170		0,25

Pinge ühik: volt.

## **Lisa 2. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Karl Valter Pall,

sünniaeg 10.06.1992,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö „Soolveetehnoloogial põhineva kütuseelemendi karakteristikud“, mille juhendaja on dotsent Risto Ilves,
  - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
  - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
  - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_

(allkiri)

Tartu, \_\_\_\_\_

(kuupäev)

---

### **Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

---

(juhendaja nimi ja allkiri)

---

(kuupäev)